第 64 卷 第 4 期 天 文 学 报 Vol. 64 No. 4
2023 年 7 月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Jul., 2023

doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2023.04.003

NGC 3603星团中的大质量逃逸双星

李 鑫[1,2,3] 孙 玮[1†] 纪 丽[1,2,3]

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)
(2 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)
(3 中国科学院暗物质与空间天文重点实验室 南京 210023)

摘要 非团环境中的大质量恒星以及大质量双星的起源是理解大质量恒星形成和演化的关键问题之一. 年轻大质量星团内的动力学交会过程是产生大质量逃逸星的重要途径之一. 选取了银河系内年轻大质量星团NGC 3603外围的两个碰撞星风系统候选体MTT68A和MTT71作为研究对象, 通过分析*Chandra* X射线观测以及*Gaia*第2批数据发布(DR2)中的天体测量结果, 研究它们作为相互作用的大质量双星系统的起源. X射线数据的分析表明, 它们的X射线能谱中存在Fe XXV发射线成分; 相较于普通O型星, 以双温等离子体模型拟合得到偏高的高温成分温度($\gtrsim$ 2.0 keV), 并且X射线光度与热光度的比值也较高($\gtrsim 10^{-5.8}$). 以上能谱特征进一步佐证了它们是碰撞星风系统的解释. 根据*Gaia* DR2数据库中的自行信息, MTT71有着与NGC 3603整体相近的自行值, 表明它很可能是与星团相伴形成. 而相对NGC 3603整体, MTT68A存在$\sim$ 4.1 $\mathrm{mas\cdot yr^{-1}}$的相对自行, 且其反方向指向星团中心附近. 这一自行结果表明MTT68A很可能是一个从星团核心区域抛出的大质量双星系统, 根据MTT68A到星团中心的投影距离和相对自行大小估算这一抛射过程大概发生在20 kyr前. 可能的动力学机制为三体或四体相互作用, 在星团另外一侧搜寻具有反向相对自行的大质量恒星将有助于验证这一推断.

关键词 恒星: 大质量, 恒星: 星风与外流, 恒星: 运动学与动力学, 恒星: 个别: MTT68, MTT71, 自行

中图分类号: P144; **文献标识码**: A

1 引言

恒星尤其是大质量恒星倾向于成团形成[1]. 观测到的非团环境中的大质量恒星很可能产生自星团演化早期的抛射过程[2–3], 亦即大质量恒星不会孤立地形成, 可能的抛射机制有双星系统中超新星爆发[4–5]以及致密星团内恒星的三体或四体相互作用[6–9]. 而相当一部分大质量场星和逃逸星是双星系统[10], 其中约40%主序O型星存在与伴星的相互作用过程[11], 这影响甚至改变大质量恒星自身的演化. 因此, 探寻和确定非团环境中的大质量双星系统的起源不仅是对大质量恒星形成理论的验证和限制, 也是研究大质量双星系统相互作用过程乃至后续演化的基础.

此前受限于缺乏高精度的自行测量, 大质量恒星抛射过程的研究仅能通过间接的方式进行, 例如寻找与高速星相伴的弓形激波[12], 然而只有在恒星速度超过当地声速的时候才有可能产生弓形激波. 随着*Gaia*卫星(以下简称*Gaia*)高精度天体测量数据的发布[13], 年轻大质量恒星从星团中抛出过程的研究变得更为直接[14–15]. *Gaia*亚毫角秒的天体测量精度使得我们可以获得10 kpc范围内大质量恒星的精度高于3 $\mathrm{km\cdot s^{-1}}$的自行数据, 从而有效地寻找大质量逃逸恒星.

此外, 处于密近双星系统中的两颗大质量恒星

2022-04-11收到原稿, 2022-05-17收到修改稿

†sunwei@pmo.ac.cn

可以构成碰撞星风系统. 来自两颗恒星的高速星风发生碰撞形成激波, 产生明亮X射线辐射[16]. 因此对它们X射线光变和能谱特征的研究能够帮助我们证认碰撞星风系统的存在.

为了研究年轻大质量星团中双星的抛射, 我们将X射线观测与高精度自行测量相结合, 对NGC 3603星团外围的两个碰撞星风系统候选体MTT68和MTT71进行研究. NGC 3603位于人马座外缘, 距离太阳7.6 kpc[17], 是银河系中少见的致密(星团核区半径$r_{\rm core}=4.8''$或者0.18 pc[18])年轻大质量星团(年龄$\lesssim 2$ Myr[17]).

Moffat等人在NGC 3603中探测到了大量的X射线点源[19], 其中MTT68和MTT71因其偏高的X射线光度与热光度的比值被认为可能是碰撞星风系统. MTT68和MTT71位于NGC 3603外围(分别距离星团中心85″和106″), 光谱型分别为O2If*[20]和O4III[20]. Huenemoerder等(以下简称H19)[21]利用*Chandra* X射线天文台(以下简称*Chandra*)高分辨率光谱观测得到了两个目标更为详细的X射线时变和能谱分析结果, 同样认为它们可能是碰撞星风系统, 不过受限于观测时长(曝光时间47 ks), 他们并未获得确定性结论. 此外, Roman-Lopes[22]通过哈勃太空望远镜(以下简称*HST*) F656N波段图像确认MTT68由A和B两颗大质量恒星组成, 他们还根据近红外和光学光谱中较宽的Paβ、N III λ21150和N IV λ4058发射线, 推测MTT68A也是一个双星系统[20].

本文拟通过分析*Chandra*的X射线成图光谱数据, 进一步研究MTT68A和MTT71双星系统的性质, 并且通过分析*Gaia*第2批发布数据(DR2)中的天体测量结果研究它们的起源. 本文的结构如下: 第2节介绍本文用到的MTT68和MTT71的观测数据与处理过程, 第3节介绍MTT68和MTT71的X射线能谱分析, 并利用*Gaia* DR2数据对两个目标天体的运动学特征进行分析, 第4节对它们X射线辐射机制以及运动学来源展开讨论, 第5节陈述本文的主要结论.

2 观测与数据处理

我们使用了*Chandra*以NGC 3603星团为目标的5次观测, 各次观测的档案编号、所用终端设备(均为先进CCD成像光谱仪-成像阵列, ACIS-I)、曝光时间、观测开始时间以及观测项目首席科学家信息见表1. 我们按照标准流程使用CIAO软件(版本号: 4.12)和校准文件数据库(版本号: 4.9.3)统一处理I级事件文件并重新生成II级事件文件. 移除光子计数速率异常的时段后, 累积曝光时长为493 ks.

表 1 *Chandra*对NGC 3603星团的X射线观测信息

Table 1 *Chandra*'s X-ray observation log of the NGC 3603 cluster

ObsID[a]	Instrument	Exposure time/ks	Start date	Pi.name[b]
00633	ACIS-I	46.78	2000-05-01	Corcoran
12328	ACIS-I	164.00	2010-10-07	Townsley
12329	ACIS-I	144.97	2010-10-15	Townsley
12330	ACIS-I	85.91	2010-10-18	Townsley
13162	ACIS-I	50.98	2010-10-23	Townsley

[a] The ID of each observation in the *Chandra* data archive.

[b] The last name of the principal investigator of individual observation.

同时, 我们借助Hubble遗珍数据库(Hubble Legacy Archive)中NGC 3603的F656N窄带滤光片下的图像判断MTT68的X射线辐射来源. 在*HST*的观测中, X射线点源MTT68被分辨为一个由MTT-68A和MTT68B构成的视双星系统, 并且两星相距0.38″[22], 接近*Chandra*的极限分辨率. 为了判定MTT68的X射线辐射主要来自MTT68A还是MTT68B, 我们以*HST*/F656N图像为基准, 通过选取并比对NGC 3603星团外围孤立的5个光学与X射线对应体在两个波段图像中的位置, 校正了*Chandra*图像的坐标. 经过坐标校正后, MTT68的*Chandra* X射线辐射中心与MTT68A的F656N光学辐射中心的相对位置见图1. 我们发现MTT68的X射线辐射中心更接近MTT68A(偏差$\sim 0.04''$–$0.07''$, 与所得坐标的不确定度相当), 而与MTT68B相距甚远(偏差$\gtrsim 0.34''$). 因此我们认

为MTT68系统的X射线辐射主要来自MTT68A, 亦即MTT68的X射线辐射主要表示了MTT68A的性质.

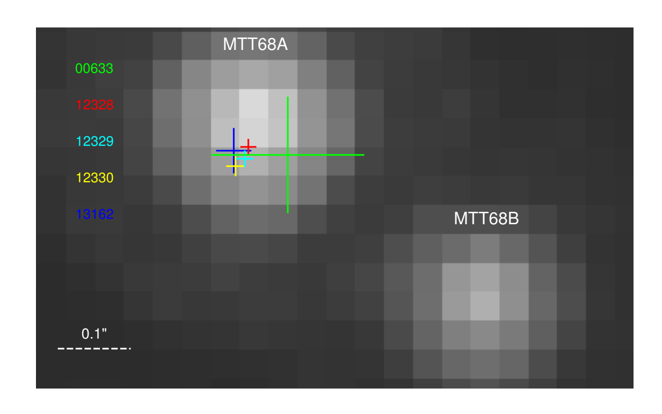


图 1　经过坐标改正后MTT68的*Chandra* X射线辐射中心与MTT68A的*HST*/F656N光学辐射中心的位置关系图, 其中不同颜色的叉丝中心表示MTT68在各次*Chandra*观测的X射线中心(各次观测的档案编号如左上方数字所示), 叉丝长短表示位置不确定度.

Fig. 1　The corrected coordinates of the *Chandra* X-ray radiation centroid overlaid on the *HST*/F656N optical image, where the center of each cross represents the X-ray centroid of MTT68 in each *Chandra* observation, whose length represents the position uncertainty, and the observational ID is labeled at the top-left corner.

在剔除目标点源落于CCD狭缝中的观测数据后, 我们分别选择4次观测(MTT68: 00633、12329、12330、13162; MTT71: 12328、12329、12330、13162)开展后续的时变与能谱的分析, 选取MTT68、MTT71的源区域与背景区域如图2所示.

此外, 我们在*Gaia* DR2的星表中查找了MTT-68A和MTT71的信息, 包括天体编号、赤经α、赤纬δ、赤经方向自行μ_α和赤纬方向自行μ_δ, 查询结果见表2. 表2的最后一列是MTT68A相对于NGC 3603的切向速度大小$v_{\rm 2D}$ (详见3.3节). 我们查找了以MTT68A和MTT71在*HST*/F656N图像中的坐标为中心, $5''$为半径的范围内的天体坐标与自行数据, 并将*Gaia* DR2中J2015.5历元的坐标转换至J2000历元后, 通过对比周围天体的坐标, 进一步更新了*HST*/F656N图像和X射线图像的坐标系统. 经过坐标校正后, 我们发现*Gaia* DR2中所列天体的坐标更接近MTT68A, 并且相应坐标的误差远远小于MTT68A和MTT68B的距离($0.38''$), 因此我们认为相应的自行信息反映的是MTT68A的运动.

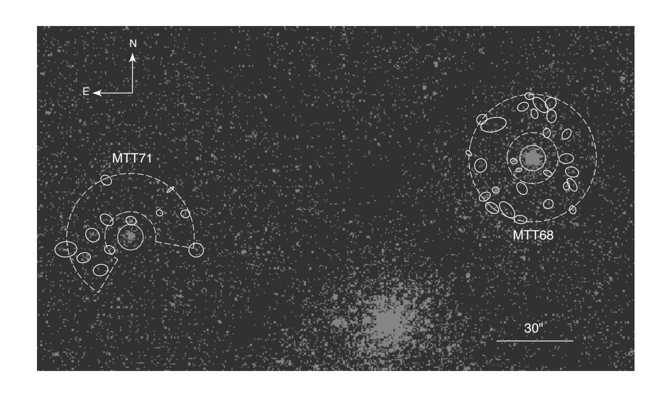


图 2　*Chandra*/ACIS-I在0.5–8.0 keV能段光子计数图, 其中圆圈与扇形区域为选取的MTT68和MTT71的源和背景区域, 椭圆表示探测到的需要扣除的点源.

Fig. 2　Photon counting map of *Chandra*/ACIS-I in the 0.5–8.0 keV energy band, in which the circles and fan-shaped areas are the selected source and background areas of MTT68 and MTT71, and the ellipses represent the detected point sources that need to be deducted.

表 2　*Gaia* DR2中MTT68A和MTT71的坐标和绝对自行信息

Table 2　Coordinates and absolute proper motions of MTT68A and MTT71 from the *Gaia* DR2 catalogue

Star	Source_id	α /°	δ /°	μ_α /(mas·yr^{-1})	μ_δ /(mas·yr^{-1})	$v_{\rm 2D}$ /(km·s^{-1})
MTT68A	5337418466518666624	168.7478	−61.2427	-8.04 ± 1.01	5.25 ± 0.80	148
MTT71	5337418157281054336	168.8388	−61.2512	-5.52 ± 0.06	2.04 ± 0.04	...

3 结果与分析

3.1 MTT68和MTT71的*Chandra* X射线光变曲线

我们使用CIAO软件的dmextract脚本提取MTT68和MTT71在各次可用观测的有效曝光时间内的X射线光变数据. 光变数据以1 ks为时间间隔, 由此绘制的0.4–8.0 keV能段光变曲线如图3所示.

我们使用柯尔莫哥洛夫-斯米诺夫检验(K-S检验)[23]以5%显著性水平考察了MTT68和MTT71的光变状况, 在各次观测中未发现MTT68或MTT-71的显著光变. 综合各次观测后, 我们发现MTT71无显著光变, 而MTT68在这一显著性水平下可以认为多次观测间存在光变, 光变幅度约为52%. 因此, 在接下来的能谱分析中对MTT71采用合并所有观测进行分析的方式, 而对MTT68采用单次观测分别分析的方式.

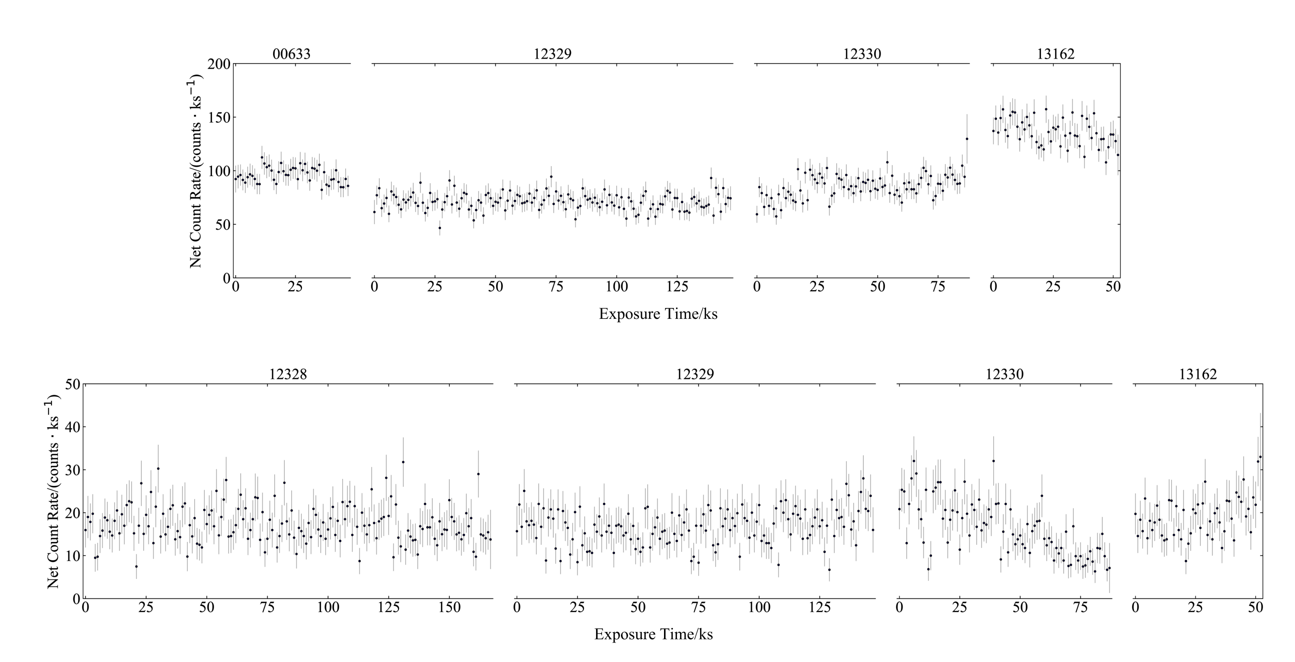


图 3 MTT68的X射线光变曲线(上)及MTT71的X射线光变曲线(下). 光变曲线上方的“12329”等数字标号为相应的观测编号. 单次观测内每个数据点间隔为1 ks, 误差棒表示标准差的大小(1σ).

Fig. 3 X-ray light curve of MTT68 (top), X-ray light curve of MTT71 (bottom). The numbers such as “12329” above the light curve indicate the corresponding observation identity document, and the interval of each data point in a single observation is 1 kilosecond, and the error bars indicate the standard error (1σ) range.

3.2 MTT68和MTT71的*Chandra* X射线能谱拟合

我们使用CIAO软件的specextract脚本提取了MTT68和MTT71在各次可用观测的X射线能谱, 同时生成相应的响应文件, 得到的能谱如图4所示. 我们使用XSPEC软件(版本号: 12.11.1)对得到的能谱进行分析. 考虑到O型星的X射线辐射来自于星风与星际介质相互作用产生的受激波加热的等离子体以及得到的能谱中典型的发射线(如1.8 keV左右的Si XIII线, 2.4 keV左右的S XV线), 我们采用热等离子体模型APEC对得到的能谱进行了拟合. 我们首先尝试了前景吸收单温等离子体模型Tbabs*APEC, 但拟合结果并不理想(归一化的残差值与自由度比值χ^2/dof在1.16–1.46之间). 为了提高拟合质量, 我们尝试使用目前分析大质量恒星星风系统X射线辐射常用的双温等离子体模型TBabs* (APEC + APEC)作能谱拟合(参见文献[24]), 并得到了可以接受的拟合结果(χ^2/dof在

0.95–1.11之间). 高低两个温度成分代表了星风热等离子体的温度区间. 对MTT68各次观测以及MTT71合并观测的能谱拟合结果见表3. 其中, 最佳拟合模型的前景吸收(等效中性氢柱密度$N_{\rm H}$)、热等离子体元素丰度Z、双温成分的温度kT_1, kT_2和辐射度[1] EM_1, EM_2等参数如第2–7列所示, 拟合残差值χ^2以及自由度dof如表3第8列所示. 各参数的误差值为90%置信区间的上下限. 同时, 我们根据最佳拟合模型得到了MTT68和MTT71在0.4–8.0 keV能量段的内禀X射线光度, 并计算了其与热光度的比值$L_{\rm X}/L_{\rm bol}$ (表3第9列). 热光度信息来自文献[25]并归算至7.6 kpc的距离处. 此外, 我们使用高斯函数拟合了6.7 keV附近Fe线的轮廓, 得到的线心能量LineE见表3最后一列.

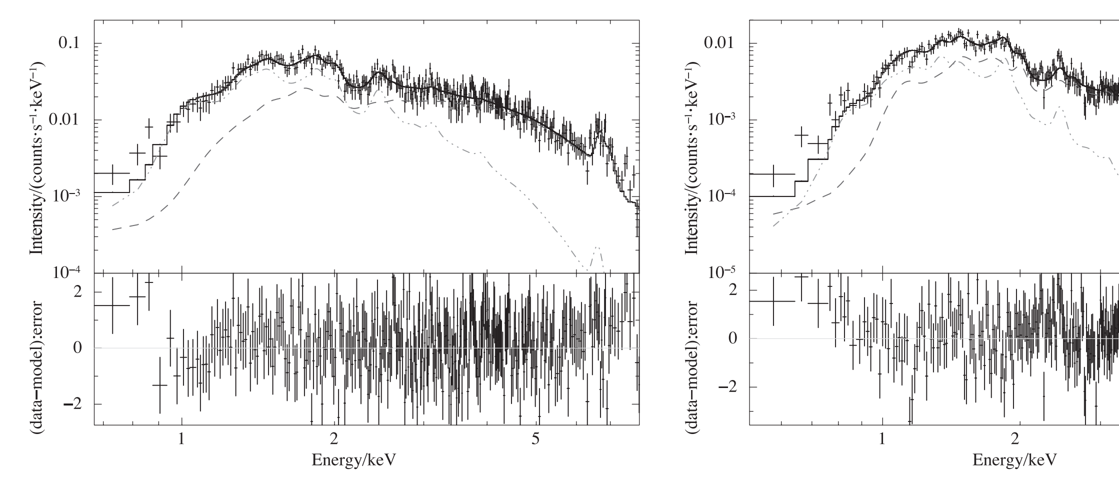


图 4 利用档案编号为13162的*Chandra*观测得到的MTT68能谱及拟合图像(左)以及利用所有可用的*Chandra*观测得到的MTT71能谱及拟合图像(右). 其中各图的上子图中离散点为得到的能谱, 折线为最终拟合模型, 链线与划线分别表示最佳拟合模型中的低温与高温成分.

Fig. 4 MTT68 energy spectrum and fitting image using the *Chandra* observation of ObsID:13162 (left), and MTT71 energy spectrum and fitting image using the all available *Chandra* observations (right). The discrete points in the top panels are the obtained energy spectra, the broken line is the best fitting model, and the chain lines and dashed lines represent the low and high temperature components in the best fitting model, respectively.

表 3 MTT68和MTT71的X射线能谱分析结果

Table 3 X-ray spectral analysis of MTT68 and MTT71

ObsId	$N_{\rm H}$ /(10^{22} cm^{-2})	Z /$Z_\odot$	kT_1 /keV	EM_1 /(10^{57} cm^{-3})	kT_2 /keV	EM_2 /(10^{57} cm^{-3})	χ^2/dof	$\lg(L_{\rm X}/L_{\rm bol})$	LineE /keV
68-00633	$1.84^{+0.08}_{-0.09}$	$0.4^{+0.2}_{-0.1}$	$0.68^{+0.14}_{-0.11}$	$2.2^{+1.2}_{-0.8}$	$4.4^{+2.6}_{-0.8}$	$0.97^{+0.17}_{-0.23}$	261/241	$-4.51^{+0.10}_{-0.11}$	$6.65^{+0.06}_{-0.06}$
68-12329	$1.90^{+0.12}_{-0.13}$	$0.4^{+0.1}_{-0.1}$	$0.80^{+0.11}_{-0.10}$	$1.6^{+0.5}_{-0.4}$	$5.2^{+1.1}_{-0.8}$	$0.80^{+0.10}_{-0.10}$	332/345	$-4.62^{+0.06}_{-0.07}$	$6.70^{+0.03}_{-0.03}$
68-12330	$1.92^{+0.09}_{-0.10}$	$0.6^{+0.2}_{-0.2}$	$1.04^{+0.10}_{-0.09}$	$1.5^{+0.4}_{-0.3}$	$9.2^{+2.9}_{-2.4}$	$0.64^{+0.09}_{-0.06}$	298/315	$-4.64^{+0.06}_{-0.06}$	$6.69^{+0.10}_{-0.08}$
68-13162	$2.06^{+0.09}_{-0.09}$	$0.9^{+0.3}_{-0.2}$	$1.05^{+0.08}_{-0.08}$	$1.7^{+0.4}_{-0.3}$	$7.8^{+1.9}_{-1.4}$	$1.00^{+0.12}_{-0.11}$	325/309	$-4.42^{+0.06}_{-0.06}$	$6.63^{+0.05}_{-0.04}$
71-combined	$1.56^{+0.08}_{-0.08}$	$0.5^{+0.2}_{-0.1}$	$0.62^{+0.11}_{-0.09}$	$4.4^{+1.6}_{-1.1}$	$2.0^{+0.2}_{-0.2}$	$2.63^{+0.41}_{-0.35}$	285/256	$-5.73^{+0.08}_{-0.10}$	$6.71^{+0.04}_{-0.04}$

[1] 辐射度的定义为电子数密度$n_{\rm e}$与质子数密度$n_{\rm p}$的乘积对体积的积分$EM=\int n_{\rm e}n_{\rm p}{\rm d}V$.

从表3可以看到, MTT68的4次观测能谱拟合结果略有差异, 并且它们与MTT71合并能谱的拟合结果差异较为明显. 对MTT68而言, 多次观测分析得到的前景吸收的等效中性氢柱密度$N_{\rm H}$在(1.8–2.1)$\times10^{22}$ cm^{-2}范围内, 而MTT71受到的前景吸收较低($N_{\rm H}=(1.6\pm0.1)\times10^{22}$ cm^{-2}). 这一结果略高于由光学或近红外波段得到的消光值推算的中性氢柱密度[20, 26], 也略高于H19的X射线能谱分析结果[21]. 但我们注意到MTT68的光学辐射相较MTT71受到了更强的消光, 而两者受到的消光均强于NGC 3603中心星团, 这个差异与我们的X射线能谱拟合结果是一致的(参考文献[19]). 与H19结果的差异可能源自采用了不同的前景吸收模型(phabs对比TBabs). MTT68和MTT71的低温成分的温度大致在0.6–1.0 keV之间, MTT68高温成分的温度在4.4–9.2 keV之间, MTT71高温成分的温度则较低($kT_2=(2.0\pm0.2)$ keV): 单独拟合的铁线线心大致在6.7 keV处, 表明它很可能是来自Fe XXV的辐射. 这一结果与20–100 MK高温成分的拟合结果一致. 相较于MTT68, MTT71的X射线光度与热光度的比值大致低了一个数量级, 但依旧远远超过了单颗O型星$L_{\rm X}/L_{\rm bol}$的典型值($\sim10^{-7}$)[27]. 高温成分温度以及X射线光度均与H19的结果一致, 但因较好的数据质量, 我们对相应参数做出了更为严格的限制. 基于温度$\sim10^{7}$–10^{8} K的高温成分、Fe XXV发射线以及偏高的$L_{\rm X}/L_{\rm bol}$等能谱特征, 我们认为MTT68和MTT71很可能是碰撞星风系统. 更为详尽的讨论见4.1节.

此外, 我们在对MTT68的4次观测的能谱分析中得到了不一致的元素丰度结果(0.4–0.9 $Z_\odot$, 见表3), 而恒星风的元素丰度在短期内不应该存在较大差异. 然而, 基于X射线图像光谱数据得到的热等离子体元素丰度并不是独立的模型参数, 等离子体温度及其偏离碰撞电离平衡的特征均会对元素丰度拟合结果造成影响. 对于各次观测拟合得到的金属丰度差异, 我们将在4.1节作进一步阐述.

3.3 MTT68A和MTT71的*Gaia*高精度自行测量结果

为了判断MTT68A和MTT71的起源, 我们从*Gaia* DR2星表数据中查找了它们的自行信息(表2), 并分别与NGC 3603整体自行作了比较. 我们采纳了Kalari等[14]估计的NGC 3603星团的整体自行: $\mu_\alpha=(-5.54\pm0.30)$ mas $\cdot$ yr^{-1}, $\mu_\delta=(1.99\pm0.39)$ mas $\cdot$ yr^{-1}. 两者的相对自行结果如图5所示: MTT71与NGC 3603具有一致的绝对自行, 偏差甚至小于*Gaia* DR2中的自行测量结果. 这一结果表明MTT71很可能是与NGC 3603星团一同形成的成员恒星. 而从MTT68A绝对自行中扣除星团的整体自行后, 仍有一个较大的相对自行: $\Delta\mu_\alpha=(-2.5\pm1.1)$ mas $\cdot$ yr^{-1}, $\Delta\mu_\delta=(3.3\pm0.9)$ mas $\cdot$ yr^{-1}. 这一自行的反方向指向星团中心(碰撞参数5.3$''$), 表明MTT68A可能是自星团核心区域抛射出来的.

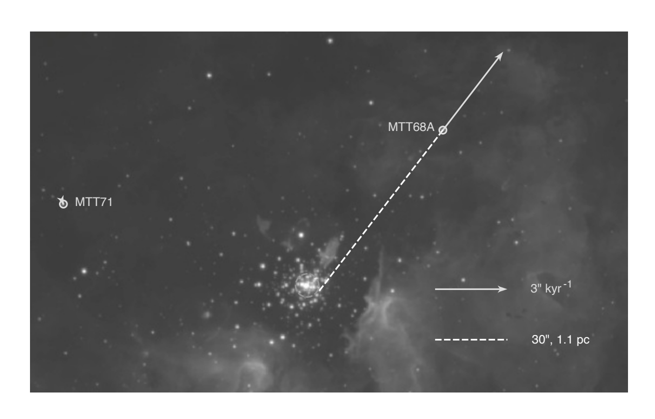


图 5 MTT68A以及MTT71的相对自行结果. 图中箭头表示目标天体的相对自行, 划线表示距离, 大圆圈表示NGC 3603星团的核心区域[18]. 右下角箭头和划线分别表示3$''\cdot$ kyr^{-1}的自行大小以及30$''$ (等效于1.1 pc)的图像尺寸大小(背景图片来自VLT-FORS1-Hα数据)

Fig. 5 Relative proper motions of MTT68A and MTT71. In the figure, the arrow indicates the relative proper motion of the target celestial body, the dashed line indicates the distance, and the big circle represents the core of NGC 3603. At the bottom-right corner, the arrow and dashed line represent a proper motion of 3$''\cdot$ kyr^{-1} and image scale of 30$''$ ($\sim$ 1.1 pc), respectively. The background image comes from the VLT-FORS1-Hα data.

我们根据MTT68A当前相对于NGC 3603星团的自行以及两者之间的投影距离, 计算得到了MTT68A的抛射时标大约为20 kyr. 这一抛射时标远小于星团的年龄, 表明MTT68A是近期从星团中抛射出去的. 假设MTT68A与NGC 3603有相同的距离, 那么它相对NGC 3603核心的相对切向速度

等于148 km·s^{-1}. 该速度也超过了NGC 3603的逃逸速度, 因而MTT68A很可能变成一个非团环境下的大质量双星系统甚至逃逸双星系统. 在4.2节中, 我们将在逃逸星论断的基础上继续探讨抛射MTT68A的动力学机制.

4　讨论

4.1　MTT68与MTT71的X射线辐射来源

我们在第2节的分析表明, MTT68的X射线辐射主要体现MTT68A的性质, 在3.2节的分析表明, MTT68和MTT71具有的X射线光度超出了单颗O型星应有的数值. Harnden等[27]的研究表明单颗O型星的X射线光度$L_{\rm X}$和热光度$L_{\rm bol}$之间存在相关性, 这种关系被表示为$L_{\rm X}/L_{\rm bol} \approx 10^{-7}$的比例关系[28]. Sciortino等人研究了热星的X射线辐射与其他特性相关的可能性, 但没有找到任何与自转、星风速度和质量损失率的相关关系[29]. 因此, MTT68和MTT71的X射线辐射需要额外的热等离子体产生机制来解释.

此外, 单颗O型星的星风热等离子体的X射线能谱通常偏软, 在碰撞电离平衡假设下, 以光学薄热等离子体模型APEC拟合能谱, 主要成分的温度不会超过1 keV[24]. 对于O型星, 通常可以通过大约0.3 keV和0.7–1.0 keV的两个热成分的叠加来实现对数据的最佳拟合[30–31]. 而在我们使用双温等离子体模型对MTT68和MTT71能谱的拟合中, MTT68的4次观测光谱的高温成分温度拟合值均在4.0 keV以上, 而MTT71的合并光谱的拟合值接近2.0 keV. 同时, 两者位于6.7 keV附近的Fe XXV发射线也是温度$\sim 10^8$ K的高温等离子体的显著特征. 从温度特征来看, MTT68和MTT71的X射线辐射不应是单颗O型星产生的.

大质量恒星产生如此高温的热等离子体包括表面磁活动和碰撞星风机制[24]. 然而, 在表面磁活动的机制下, 即便是极端的磁约束的星风激波情形也很难产生$\lg(L_{\rm X}/L_{\rm bol}) \gtrsim -5.8$如此强烈的X射线辐射[32]. 因此, 我们推断它们很可能是碰撞星风双星. 然而, 受观测数据持续时间(除了ObsID:00633这次观测之外, 其他观测分布在16 d的时间段内)以及数据质量所限, 我们并未观测到MTT68和MTT71的辐射随轨道周期调制这一碰撞星风系统的决定性证据. 进一步的X射线观测及分析将为我们带来更为确定的答案.

此外, 在碰撞星风系统中的热等离子体很可能处于非电离平衡的状态. 我们尝试采用平板激波模型TBabs*pshock拟合MTT68的各次观测. 根据不同观测拟合得到的元素丰度在0.38–0.66 $Z_\odot$之间, 对比双温等离子体模型中的0.4–0.9 $Z_\odot$, 金属丰度差异有所减小但依旧显著. 然而, 在对碰撞星风系统的X射线辐射的能谱分析中, 即便使用pshock模型可能依旧过于简化[33–34]. 更复杂的能谱模型拟合超出了本文采用的*Chandra* X射线数据的能力以及本文的宗旨.

4.2　抛射MTT68A的动力学机制

由于星团中存在一个致密的核心[18], 其中存在非常多的大质量恒星与双星系统, 导致NGC 3603在当前阶段可以高效地产生大质量逃逸星[8, 35].

NGC 3603星团的年龄较小意味着MTT68A的逃逸是由动力学抛射过程所致, 具体原因在于星团核心中的双星-双星或双星-单星交会. 在第1种情况下, 交会的常见结果是改变质量较大的双星的轨道偏心率, 并以较高的速度将质量较小的双星抛射出去. 在第2种情况下, 一般参与交会的质量最小的单颗恒星会被高速抛出, 而双星系统则朝单颗恒星对立的方向反冲. 这两种情况下, 被抛射出的高速恒星都以交会后的双星增加结合能为代价获得了动能. 如果双星轨道间距足够小, 它最终可能会合并成一颗单星[36]. 因此, 如果通过三体或四体交会将MTT68A抛射到星团场中, 那么可以预言在NGC 3603的另一侧应该存在一个大质量单星或双星[8]. 在*Gaia* DR2数据库中搜寻相反方向上具有相反自行的大质量天体将有助于验证这一猜想.

5　结论

年轻大质量星团核心区域的动力学交会过程是产生非团环境中大质量恒星的重要途径之一. 我们选取了NGC 3603外围的两个碰撞星风系统候选体MTT68和MTT71, 通过分析其*Chandra* X射线

数据以及*Gaia* DR2自行数据研究了它们的X射线性质及起源. 我们发现:

1. MTT68的X射线辐射中心以及*Gaia* DR2查询到的点源位置都更靠近MTT68A, 因而它们反映的都是MTT68A而非MTT68B的性质;

2. MTT68A和MTT71的X射线能谱均能够用双温热等离子体模型很好地拟合, 其中高温成分的温度$kT_2 \gtrsim 2$ keV, 并且Fe XXV发射线的存在也佐证了高温成分的温度; 结合它们超出普通单颗O型星应有的X射线光度($\lg(L_{\rm X}/L_{\rm bol}) \gtrsim -5.8$), 我们推断它们很可能是两颗相互作用的大质量恒星组成的碰撞星风系统;

3. 根据*Gaia* DR2中的信息, MTT71具有与NGC 3603整体相近的绝对自行, 因而很可能是与NGC 3603一同形成的成员恒星; 而MTT68A相较NGC 3603存在一个~ 4.1 mas$\cdot$yr^{-1}的相对自行, 其反方向指向星团中心, 因此它很可能是20 kyr前从星团中抛射出去的大质量双星系统. 对相反方向上具有特定自行的大质量恒星的搜寻有助于我们获得对动力学交会抛射恒星这一机制更为全面的理解.

致谢 感谢编辑和审稿人对论文评阅工作的辛勤付出. 感谢张水乃博士和鄢淑平博士对文章写作提出的宝贵建议. 感谢*Chandra* X射线数据库以及*Gaia* DR2提供的数据.

参考文献

[1] Lada C J, Lada E A. ARA&A, 2003, 41: 57
[2] de Wit W J, Testi L, Palla F, et al. A&A, 2005, 437: 247
[3] Gvaramadze V V, Bomans D J. A&A, 2008, 490: 1071
[4] Blaauw A. BAN, 1961, 15: 265
[5] de Wit W J, Testi L, Palla F, et al. A&A, 2004, 425: 937
[6] Gvaramadze V V, Kroupa P, Pflamm-Altenburg J. A&A, 2010, 519: A33
[7] Fujii M S, Zwart S P. Science, 2011, 334: 1380
[8] Gvaramadze V V, Gualandris A. MNRAS, 2011, 410: 304
[9] Gvaramadze V V, Weidner C, Kroupa P, et al. MNRAS, 2012, 424: 3037
[10] Chini R, Hoffmeister V H, Nasseri A, et al. MNRAS, 2012, 424: 1925
[11] Sana H, de Mink S E, de Koter A, et al. Science, 2012, 337: 444
[12] Gvaramadze V V, Kniazev, A Y, Chené A N, et al. MNRAS, 2013, 430: L20
[13] Brown A G A, Vallenari A, Prusti T, et al. A&A, 2018, 616: A1
[14] Kalari V M, Vink J S, de Wit W J, et al. A&A, 2019, 625: L2
[15] Drew J E, Monguió M, Wright N J. MNRAS, 2019, 486: 1034
[16] Rauw G, Naé Y. AdSpR, 2016, 58: 761
[17] Melena N W, Massey P, Morrell N I, et al. AJ, 2008, 135: 878
[18] Harayama Y, Eisenhauer F, Martins F. ApJ, 2008, 675: 1319
[19] Moffat A F J, Corcoran M F, Stevens I R, et al. ApJ, 2002, 573: 191
[20] Roman-Lopes A, Franco G A P, Sanmartim D. ApJ, 2016, 823: 96
[21] Huenemoerder D P, Schulz N S, Nichols J S. AJ, 2019, 157: 29
[22] Roman-Lopes A. MNRAS, 2013, 435: L73
[23] Wall J V, Jenkins C R. Practical Statistics for Astronomers. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2012: 110-111
[24] Güdel M, Nazé Y. A&ARv, 2009, 17: 309
[25] Crowther P A, Dessart L. MNRAS, 1998, 296: 622
[26] Güver T, Özel F. MNRAS, 2009, 400: 2050
[27] Harnden Jr F R, Branduardi G, Elvis M, et al. ApJ, 1979, 234: L51
[28] Pallavicini R, Golub L, Rosner R, et al. ApJ, 1981, 248: 279
[29] Sciortino S, Vaiana G S, Harnden Jr F R, et al. ApJ, 1990, 361: 621
[30] Sana H, Rauw G, Nazé Y, et al. MNRAS, 2006, 372: 661
[31] Antokhin I I, Rauw G, Vreux J M, et al. A&A, 2008, 477: 593
[32] ud-Doula A, Nazé Y. AdSpR, 2016, 58: 680
[33] Zhekov S A. MNRAS, 2017, 472: 4374
[34] Zhekov S A. MNRAS, 2021, 500: 4837
[35] Gvaramadze V V, Gualandris A, Portegies Zwart S. MNRAS, 2009, 396: 570
[36] Hills J G, Day C A. BAAS, 1975, 7: 535

The Massive Runaway Binaries in NGC 3603 Cluster

LI Xin[1,2,3] SUN Wei[1] JI Li[1,2,3]

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)
(2 School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)
(3 Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

Abstract Massive stars tend to form in clustered environments. The origin of the massive stars and binaries outside clusters is one key to understand the formation and evolution of massive stars. The authors selected two colliding wind candidates, MTT68 and MTT71, and probed their origin by analyzing the *Chandra* X–ray observation and the proper motions queried from the *Gaia* Data Release 2 (*Gaia* DR2) catalog. Those two targets are located on the margin of NGC 3603, the galactic massive cluster 7.6 kpc away. MTT68 has been resolved as a visual binary of MTT68A/B, and MTT68A itself was proposed as a close massive binary. The authors compared the centroid of the X–ray emission and the coordinate queried from *Gaia* DR2 catalog, to those of MTT68A/B on the *HST* image, and found that both of them are close to MTT68A but far away from MTT68B, which suggests the X–ray characteristic and the astrometry measurement both mainly describe MTT68A instead of MTT68B. They also carried out the X-ray spectral analysis of MTT68A and MTT71, and found (1) the existence of the Fe XXV line in their spectra, (2) a second component of temperature $kT \gtrsim 2.0$ keV is required when fitting their spectra with hot plasma models, and (3) their ratio of X-ray to bolometric luminosity, $\lg(L_X/L_{bol}) \gtrsim -5.8$, is at least one order of magnitude higher than the value of isolated O-type stars. All above features further prove their colliding wind scenario. Besides that, they analyzed the astrometry measurements of MTT68A and MTT71 queried from the *Gaia* DR2 database. MTT71 has an absolute proper motion similar to the overall value of NGC 3603, which suggests it formed associated with NGC 3603 without ejection process. In contrast, MTT68A has a significant proper motion relative to NGC 3603: the relative proper motion in the right ascension direction $\Delta\mu_\alpha = (-2.5 \pm 1.1)$ mas · yr^{-1} and declination direction $\Delta\mu_\delta = (3.3 \pm 0.9)$ mas · yr^{-1}, resulting a direction that opposites to the core region of NGC 3603. Hence the authors propose that MTT68A is a massive binary ejected 20 kyr ago, and single-binary and binary–binary interactions are possible mechanisms. A search for the massive star with reverse relative proper motion at the opposite side of the cluster will be helpful to verify this hypothesis.

Key words stars: massive, stars: winds and outflows, stars: kinematics and dynamics, stars: individual: MTT68, MTT71, proper motions